

# 반도체 세정 공정 평가를 위한 나노입자 안착 시스템 개발

남경탁<sup>†</sup> · 김호중\* · 김태성\*\*

## Development of Particle Deposition System for Cleaning Process Evaluation in Semiconductor Fabrication

Kyungtag Nam, Hojoong Kim and Taesung Kim

**Key Words :** Contamination(오염), Nanoparticle(나노입자), Cleaning(세정), Deposition(안착)

### Abstract

As the minimum feature size decreases, control of contamination by nanoparticles is getting more attention in semiconductor process. Cleaning technology which removes nanoparticles is essential to increase yield. A reference wafer on which particles with known size and number are deposited is needed to evaluate the cleaning process. We simulated particle trajectories in the chamber by using FLUENT and designed a particle deposition system which consists of scanning mobility particle sizer (SMPS) and deposition chamber. Charged monodisperse particles are generated using SMPS and deposited on the wafer by electrostatic force. The experimental results agreed with the simulation results well in terms of particle number and deposition area according to particle size, flow rate and deposition voltage.

### 기호설명

- $C_c$  : 미끄럼 보정계수  
 $D_w$  : 웨이퍼 지름  
 $d$  : 전극간 거리  
 $d_i, d_p$  : 챔버 입구 지름, 입자 지름  
 $E$  : 전기장 강도  
 $e$  : 전자의 전하  
 $F_E$  : 정전기력  
 $n$  : 단위 하전수  
 $q$  : 입자의 하전수  
 $V$  : 유입 속도  
 $V_b, V_E$  : 사태 전압, 인가 전압

### 1. 서론

반도체 선폭이 점점 작아지고 공정이 정밀해짐에 따라 입자에 의한 오염의 제어가 중요해지고 있다. Table 1은 2006년 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)에서 발췌한 최소 DRAM half pitch와 그에 따른 killer particle size를 나타낸다. 2009년 50 nm 공정기술이 사용되면 제어해야 될 입자의 크기는 25 nm가 되어 이를 극복하기 위해서는 클린룸과 세정 공정의 최적화, 그리고 공정 중에 발생하는 미세입자 제어기술 등이 필수적이다.

**Table 1** DRAM half pitch and critical particle size (ITRS, 2006 Update).

	2006	2007	2008	2009
DRAM 1/2 pitch (nm)	70	65	57	50
Critical particle size (nm)	35	32.5	28.5	25

<sup>†</sup> 성균관대학교 기계공학과 대학원

\* 성균관대학교 성균나노과학기술원 대학원

\*\* 성균관대학교 기계공학부 & 성균나노과학기술원

E-mail : [tkim@skku.edu](mailto:tkim@skku.edu)

TEL : (031)290-7466 FAX : (031)290-5889

본 연구에서는 세정 공정 평가에 필요한 표준 웨이퍼 제작을 위한 입자 안착 시스템 (Particle Deposition System)을 개발하였다. 입자안착 시스템은 웨이퍼 표면에 특정 크기의 입자를 일정한 농도로 안착시킬 수 있는 시스템이다. 이를 통해 제작된 표준 웨이퍼로 세정 공정의 효율을 평가할 수 있다.

입자안착 시스템은 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)와 deposition chamber로 구성되며, FLUENT를 이용하여 챔버 내부에서의 에어로졸 유동을 해석하여 챔버를 최적화하였고, 실험을 통해 이를 검증하였다. 또한 인가전압, 안착시간, 에어로졸 유량이 입자의 안착에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

## 2. 수치적 해석

### 2.1 지배 방정식과 해석 모델

챔버 내부의 정상상태 유동을 해석하기 위해 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + F_E \quad (2)$$

에너지 방정식:

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

여기서  $k_{eff}$ 는 유효 열 전도도를 나타내며,  $\bar{\tau}$ 는 점성 항이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \nabla \vec{v} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

위 식에서  $I$ 는 단위 텐서를 나타낸다. 식 (2)에서  $F_E$ 는 입자에 작용하는 정전기력으로 다음과 같다.

$$F_E = qE = neE \quad (5)$$

위와 같은 비선형지배 방정식의 해를 구하기 위해 FVM (Finite Volume Method)을 사용하였다<sup>(1)</sup>. 또한 이산화를 통해 각 변수에 대해 방정식을 계산하기 위해 SIMPLE 알고리즘과 층류 모델을 사용하였으며, 브라운 운동을 고려하였다.

챔버 입구의 지름은 7 mm, 입구와 웨이퍼 사이의 거리는 25 mm 이고, 작동압력은 상압이며, 중심축에 대해 축대칭으로 2D 해석을 수행하였다. 기판은 6 inch 웨이퍼를 사용하였다.

### 2.2 경계 조건

해석 시 입자는 300 nm PSL을 대상으로 하였으며, 입구에서 유량은 0.25 lpm으로 하였다. 이러한 조건하에서 입자의 균일한 안착을 위해 챔버 내부에서의 유동은 층류가 되어야 하며, 식 (5)에 의해 챔버 내부의 유동이 층류임을 확인할 수 있었다.

$$Re = \frac{\rho V d_i}{\mu} = 66000 V d_i \quad (6)$$

입자의 운동은 정전기력에 의해 많은 영향을 받는다<sup>(2)</sup>. 챔버에 전압을 인가하여 내부에 정전기장을 형성시키는데, 사태 전압보다 큰 전압을 인가하면 웨이퍼가 타게 된다. 따라서, 식 (6)에 의해 0 ~ 20000 V의 전압을 걸어주었다.

$$V_b = \frac{365(pd)}{1.18 + \ln(pd)} \quad (7)$$

입자에 작용하는 정전기력을 구현하기 위해서 전기장의 세기와 중력가속도 사이의 관계를 구하여, 중력가속도 항에 적용시켰다.

먼저 챔버 내부의 전기장 강도는 위치에 따라 다르기 때문에 다음 식으로부터 평균 전기장 강도를 구하였다.

$$E = 2.36 \left( \frac{V_E}{D_w} \right) \quad (8)$$

식 (5)를 통해 정전기장에 놓여진 입자가 받게 되는 힘  $F_E$ 를 구하여 입자의 질량으로 나누어 주면, 입자의 가속도를 구할 수 있고, 이 값은 중력가속도에 비해 매우 크기 때문에 중력가속도 항에 적용하였다.

### 2.3 해석 결과

챔버 내부 유동이 층류가 되는 것을 확인하였고, 300 nm PSL 입자에 대해 해석을 수행하였다. 전압을 인가하지 않은 경우 대부분의 입자들이 웨이퍼를 벗어났지만 (Fig. 1(a)), 5000 V의 전압을 인가한 경우, 모든 입자들이 웨이퍼 중심에 안착되는 것을 확인하였다 (Fig. 1(b)).

## 3. 실험적 해석

### 3.1 입자 안착 시스템

입자 안착 시스템은 SMPS와 챔버로 구성되어 있으며 Fig. 2에 개략도를 도시하였다. SMPS를 통해 특정 크기의 입자를 일정한 농도로 얻은 후, 웨이퍼에 안착시키게 된다. 입자 생성 메커니즘은 다음과 같다.

필터를 거친 sheath air가 고속으로 atomizer에 들어가서 DI water를 분무시킨다. 이때 에어로졸이 생성되며 dryer를 지나면서 에어로졸에 포함된 수분이 제거된다. 생성된 입자들이 지닌 전하량이 불규칙하기 때문에 neutralizer를 통해 평형화 시켜준다.

DMA에서는 인가 전압에 따라 특정 크기의 입자만을 분류해낸다. 인가 전압과 입자 크기의 관계식은 다음과 같다.

$$d_p = \frac{2n_p e C_c V_d L}{3\mu Q_{sheath} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (9)$$

이를 통해 추출된 입자의 크기를 알 수 있고, 또한 CPC를 이용해서 추출된 입자의 수농도를 알게 된다. SMPS를 통해 얻은, 크기와 농도를 알고 있는 입자를 정전기장이 형성되어 있는 챔버에서 웨이퍼 표면에 안착시키는 것이다.

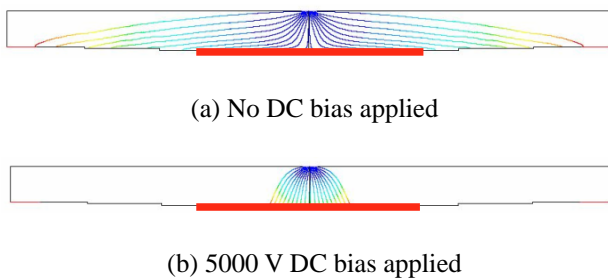


Fig. 1 Effect of DC bias on particle trajectories.

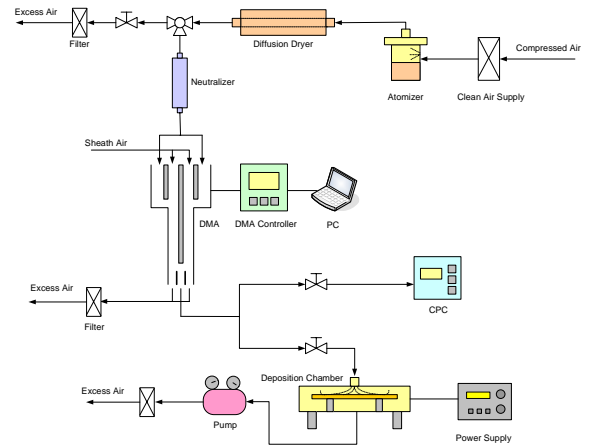


Fig. 2 Schematic of Particle Deposition System.

### 3.2 실험 조건 및 과정

수치해석 결과를 검증하고 DMA에서 특정 크기의 입자만 분류해내는 것을 확인하기 위해 100, 200, 300 nm 크기의 PSL 입자를 섞어 주었고, 충분한 압력의 sheath air로 입자를 생성시켰다. kr-85 neutralizer를 사용하였으며, 300 nm PSL 입자만 얻기 위해 DMA에 6620 V의 전압을 인가하였다.

챔버로 유입되는 에어로졸의 유량은 0.25 lpm을 유지하였고, 챔버에는 5000 V의 전압을 인가하여 10초동안 입자를 6 inch 웨이퍼에 안착시켰다.

또한, 500 nm 알루미늄 입자에 대한 실험도 수행하여 입자의 안착에 영향을 주는 인자에 대해 연구하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 수치해석과 비교

Surface scanner (Tencor Surfscan-6200)를 이용하여 웨이퍼 표면을 확인하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 약 280 nm 크기의 PSL 입자가 추출되어 웨이퍼 중심에 안착되었고, 안착된 면적의 크기가 수치해석 결과와 유사하였다. 따라서, SMPS에서 전압 제어를 통해 특정 크기의 입자를 얻을 수 있고, 설계된 챔버에서 표준 웨이퍼 제작이 가능하게 되었다.

### 4.2 안착 시간의 영향

500 nm 알루미늄 입자에 대해 유량 (0.25 lpm)과 챔버 인가 전압 (10 kV)을 유지하고, 안착 시간을 1, 2, 3 min으로 증가시켰다. Figure 4에서

볼 수 있듯이 안착 면적의 변화없이 안착된 입자의 수농도는 안착 시간에 대해 일정한 비율로 증가하였다.

#### 4.3 인가 전압의 영향

500 nm 알루미늄 입자에 대해 유량 (0.25 lpm) 과 안착 시간 (2 min)을 유지하고, 챔버 인가 전압을 5, 10, 15 kV 로 증가시켰다. 입자에 작용하는 정전기력이 커지기 때문에, 입자의 안착 면적이 점차 작아지는 것을 알 수 있다 (Fig. 5 참조). 단, 안착된 입자의 수농도에는 변화가 없었다.

#### 4.4 유량의 영향

500 nm 알루미늄 입자에 대해 챔버 인가 전압 (10 kV)과 안착 시간 (2 min)을 유지하고, 유량을 0.2, 0.25, 0.3 lpm 으로 증가시켰다. 유량의 증가로 인해 챔버에서의 에어로졸 유동 속도가 증가하여 입자의 안착 면적이 커지는 것을 보였다 (Fig. 6 참조).

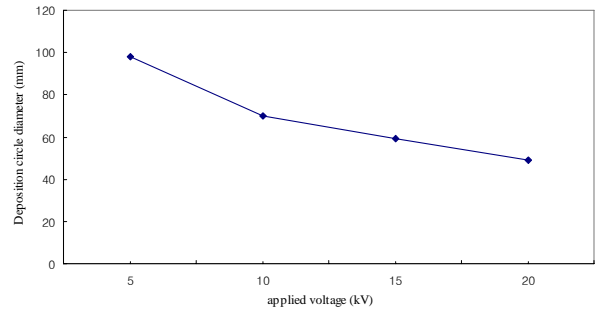


Fig. 5 Deposition result – varying applied voltage.

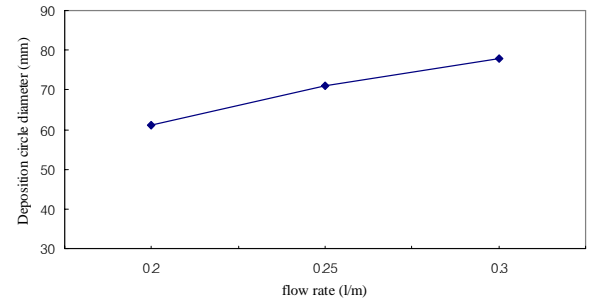


Fig. 6 Deposition result – varying flow rate.

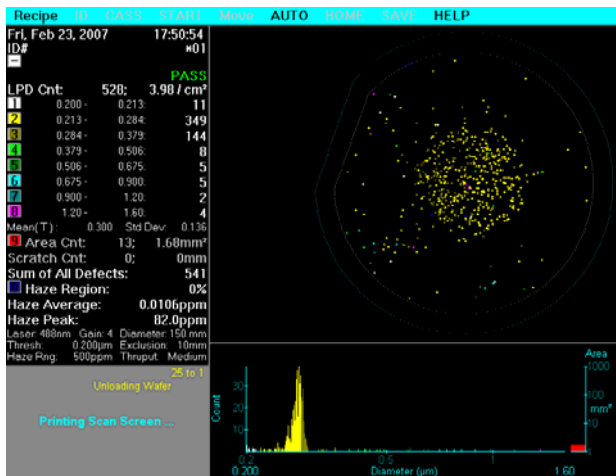


Fig. 3 Deposition result by surface scanner.

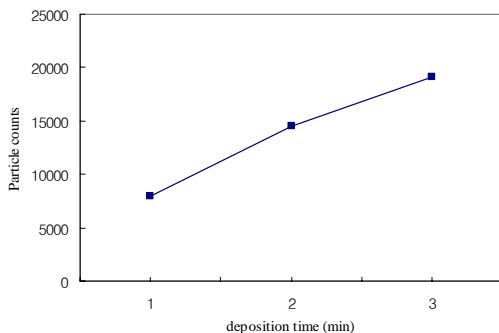


Fig. 4 Deposition result – varying time.

## 5. 결론

본 연구에서는 입자 안착 시스템에서의 입자의 거동에 대한 수치적 해석과 실험 결과를 비교하였다. 수치적 해석에 있어서 정전기력의 영향을 입자에 작용하는 가속도로 변환하여 구하였고, 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 유사하였다. 그리고, 안착 시간이 증가함에 따라 안착된 입자의 수농도가 증가하고, 챔버의 인가 전압이 증가함에 따라 입자를 끌어당기는 정전기력이 강해져서 입자의 안착 면적이 작아진다. 또한, 에어로졸의 유량을 증가시키면 입자의 운동 속도가 증가하여 입자의 안착 면적이 커진다.

향후 입자 안착 시스템으로 표준 웨이퍼를 제작하여 세정 실험을 수행함으로써 세정 효율의 평가에 유용하게 사용될 것이다.

## 후기

Surface scanner 측정에 도움을 주신 한양대학교 박진구 교수님 연구실에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Patankar, S. V., 1990, *Theoretical Hydro-dynamics 5<sup>th</sup> Ed*, Hemisphere, New York.
- (2) Ahn K.H., Ahn J.H., Lee K.S., Lim K.O. and Kang Y.H., 2005, "Numerical Simulation of Deposition Chamber for Aerosol Nanoparticles Upward 300 mm Wafer," *Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 49~53.
- (3) Woo K.S. and Benjamin Y. H. Liu, 1997, "A Particle Deposition System for the Preparation of Standard Calibration Wafers," *Institute of Environmental Sciences, Annual Technical Meeting*. Vol. 43, No. 2, pp. 84~92.
- (4) Hinds William C., 1999, *Aerosol Technology : Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles 2<sup>nd</sup> Ed*, John Wiley & Sons, Inc., New York.